

法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

変異雑音フリー干渉計 (DFI) 重力波検出器のための 能動防振システムの開発

著者	大田 翔史
出版者	法政大学大学院理工学・工学研究科
雑誌名	法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編
巻	58
発行年	2017-03-31
URL	http://hdl.handle.net/10114/13598

変位雑音フリー干渉計(DFI)重力波検出器 のための能動防振システムの開発

DEVELOPMENT OF AN ACTIVE VIBRATION ISOLATION SYSTEM
FOR DISPLACEMENT NOISE FREE INTERFEROMETER (DFI) GRAVITATIONAL WAVE DETECTOR

大田翔史

Shoji OHTA

指導教員 佐藤修一

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻（創生科学系）修士課程

Displacement noise Free Interferometer(DFI) is the gravitational wave detector which can cancel the displacement noise on the mirrors. Its cancellation ability has already been verified in the past experiments. However, there is an unexpected noise at low frequency on the DFI sensitivity, and it seemed to be seismic origin because of the behavior of the noise. In this study, we developed an active seismic isolation system to specify and mitigate this unexpected noise. The vibration isolation table is feedback-controlled, and the seismic noise on the table was measured in a stand-alone environment. In consequence, we successfully performed very-low seismic noise level, attenuated -40dB from ground motion.

Key Words : Gravitational wave, Displacement-noise Free Interferometer, Active vibration isolation

1. 研究背景

重力波とは一般相対性理論から導かれる時空のゆがみが光速で伝搬する現象である。1915 年に Einstein によって予言された後、1974 年に Taylor らによって間接的にその存在が証明され、そして 2016 年に advanced LIGO によって初の直接検出がなされた[1]。重力波信号は非常に微弱で、通常のレーザー干渉計では、鏡を直接揺らすような雑音（変位雑音）や測定時に発生するセンシング雑音がその検出を難しくする。

(1). 変位雑音フリー干渉計 (DFI)

川村氏と Yanbei 氏によって提案された変位雑音フリー干渉計 (Displacement noise Free Interferometer, 通称 DFI) [2] では、この変位雑音の影響をキャンセルすることができる。DFI を実現する最もシンプルな干渉計は双方向 Mach-Zehnder 干渉計 (MZI) である[3] (図 1)。これは MZI に逆方向から全く同じ光路を通るように光を入射させることで、鏡の変位を 2 つの干渉計で同時測定できる仕組みになっていて、これらの信号を引き算することで変位雑音をキャンセルすることができる。DFI によって変位雑音が全てキャンセルされると、残る雑音は原理的にはレーザーの光子揺らぎにより発生するショットノイズのみとなる。

しかし先行実験[4, 5]では低周波での残留雑音が確認されている。図 2 に示すのは、地面振動と空気揺らぎの雑音を抑えた環境での DFI および MZI の感度スペクトルで

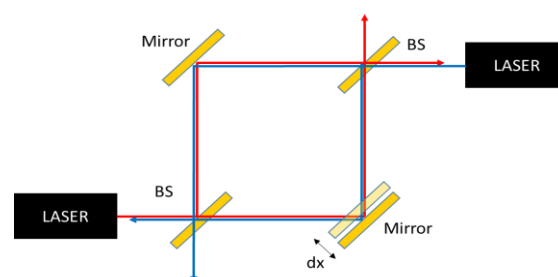


図 1 双方向 Mach-Zehnder 干渉計

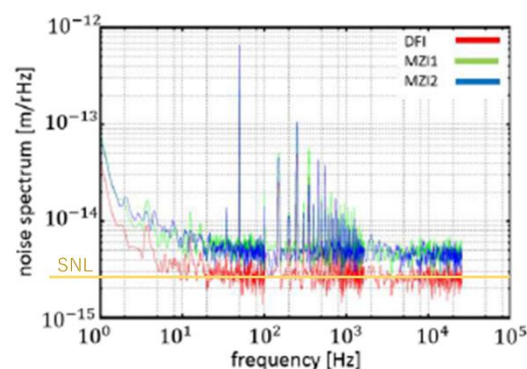


図 2 Fiber-coupled monolithic DFI の感度

ある。黄色線はショットノイズレベル(SNL)を表しており、DFI がショットノイズのみに制限されていれば全周波数帯で SNL と一致する感度が得られるはずで

ある．SNL に一致していない 5Hz 以下の帯域で残留雑音を確認できる．この残留雑音の正体は，昼と夜でスペクトルを測定したときにその大きさが異なること，地面振動もそのような性質を持つことから地面振動由来の雑音であると推測される．

2. 研究目的

先行実験から地面振動由来の雑音が感度を制限していることが示唆された．地面振動由来の雑音かどうかを確認めるには，地面振動防振環境下で DFI 実験を行い，感度が良くなるかどうかを確認めればよい．そこで本研究では，残留雑音に感度を制限されている 1～5Hz の周波数帯で，大きく防振できるような防振システムの開発を目的とする．

3. 防振システムの構成

防振システムの概略図を示す．

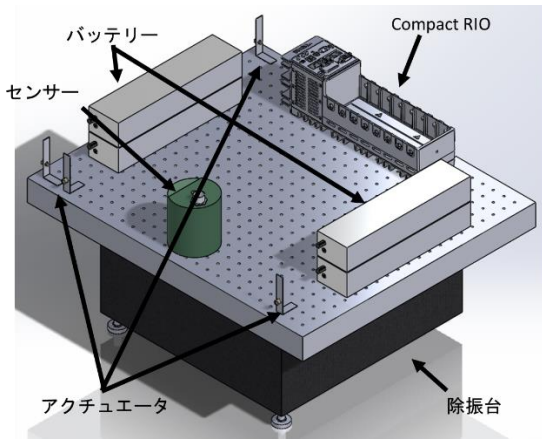


図 3 防振システムの構成

除振台の上のセンサーにより揺れを検出し，アクチュエータにフィードバックすることで高い防振性を持つ環境を実現する．除振台以外の部分で外部環境との物理的接触があると，そこから地面振動が混入する恐れがある．これを避けるために電気回路とセンサー，デジタルシステムのためのバッテリーを除振台の上に搭載し，また対象に非接触なアクチュエータの導入，無線 LAN アクセスポイントを利用したデジタルシステムのリモート制御などにより，完全にスタンドアロンな制御システム，および計測システムを実現する．中央のスペースは今後の DFI 実験を考慮し意図的に空けている．

(1) 除振台

機械的に地面振動を低減するために minus k technology 社の除振台を用いる．実験に必要なものは全て除振台の上に配置し，外部環境と非接触にする．この除振台は積載総重量が 48kg のときに最も防振比が良くなるので，カウンターウェイトを用いて重さと重心の微調整を行った．この除振台の公称の防振比を次に示す．

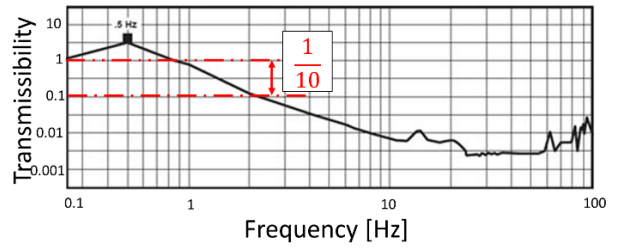


図 4 除振台の防振比[3]

高周波帯域では地面振動は大きく減衰しているが，肝心の 1～5Hz では最大で 1/10 の防振効果しか期待できないことが予想される．そこでフィードバック制御を用いた能動防振により更なる地面振動の低減を目指す．

(2) フィードバック制御

地面振動を低減させるためのフィードバック制御は，揺れを検出するセンサーと制御を安定させるためのフィルタ，フィードバック信号を実際の力に変換するアクチュエータによって構成される(図 5)．

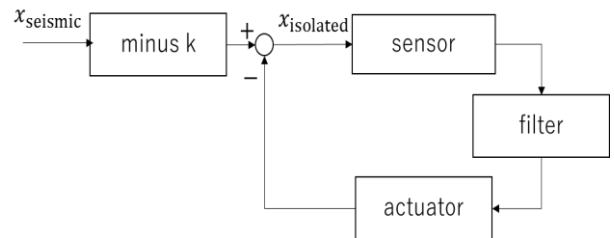


図 5 フィードバック制御のブロックダイアグラム

除振台，センサー，フィルタ，アクチュエータの伝達関数をそれぞれ M , S , F , A とすると，能動防振システムの防振性能を代数的に計算することができる．

$$x_{\text{isolated}} = \frac{M}{1 + S \cdot F \cdot A} x_{\text{seismic}} \quad (1)$$

$S \cdot F \cdot A$ の項が 1 以上の値をとれば，除振台に加えて更に防振することが期待できる．センサーとアクチュエータの伝達関数は簡単に変更することができないので，フィルタの伝達関数で制御の調整を行う．

(3) センサー

Nanometrics 社が提供する Trillium compact を用いる．このセンサー 1 つで x , y , z 軸方向の速度信号を得ることができるが，水平方向の防振が目的なので x , y 方向のみの信号を使用する．対象性などの理由からセンサーを光学定盤の中心に固定するべきではあるが，研究のメインである DFI のための実験スペースを優先し，端に配置した．フィードバック制御において，センサーの感度が悪いとノイズを制御対象に印加することに繋がるため，できるだけ感度の良いセンサーを使用したほうが良い．今回使用するセンサーの，変位に対する感度スペクトルを以下に示す．

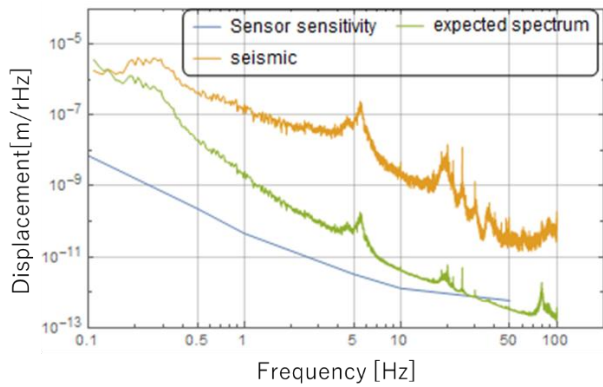


図6 センサーの感度と地面振動の比較：青線がセンサーの感度を、橙線が地面振動を、緑線が能動防振によって期待されるスペクトルをそれぞれ表している。

およそ 40Hz 以下ではセンサーの感度が、期待される感度スペクトルを制限することはないことがわかる。

(4) フィルタ

フィルタは電気回路を使用するのが簡単な方法である。しかし将来的に並進 3 自由度と回転 3 自由度の合計 6 自由度に対して制御を掛けるときには、複雑な信号処理が必要になることが予想される。そこでデジタルフィルタを用いることにする。これにより複雑な信号処理やフィルタパラメータの変更などが比較的容易となる。デジタルフィルタの実現には FPGA と real time processor が搭載されている National instruments 社の compact RIO を用いる。このデバイスには無線 LAN アクセスポイントを接続して、ネットワーク通信によって外部の PC からリモートコントロールする。

フィルタの周波数特性は制御の安定性の要求から 1 次のハイパス特性を持つものを作成した。

(5) アクチュエータ

防振システム上では地面振動の混入を防ぐため、外部と完全に非接触にする必要がある。そこで電流を流したコイルとマグネットの間に働く電磁気力を利用したコイルマグネットアクチュエータを使用する。

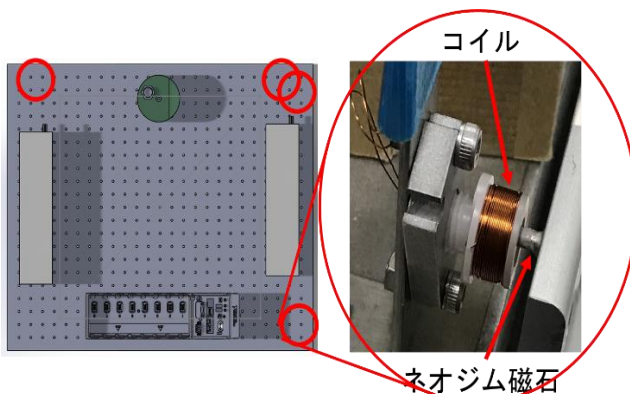


図7 コイルマグネットアクチュエータの配置と概観

アクチュエータは図7の太い赤枠で示した4点に配置し、水平方向に力を加えられるようにした。

(6) バッテリー

実験系の稼働時間はこのバッテリーの容量が決める。しかしバッテリーの容量が大きければ大きいほどそのサイズが増加するので、実験スペースとのトレードオフとなる。本実験では、BAYSAN 社の ARCA RX16 を 4 台用いた。定盤に搭載するときは実験スペースの確保のために、図3のように重ね、固定した。また回路系の消費電力は次のとおりである。

表1 消費電力の見積もり

名称	最大消費電力[W]
Compact RIO	46
Trillium compact	0.16
アクチュエータ	8
その他回路系	8

単純計算では、総電池容量 $120\text{Wh} \times 4 = 480\text{Wh}$ に対して、実験系の全体の消費電力は 1 時間当たりおよそ最大 62W であるので、連続稼働時間はおよそ 8 時間となる。

(7) 計測、解析システム

実験系は外部との接触を完全に遮断する必要があるので通常の計測、解析機器を使用することができない。そこでフィルタの作成のときに使用した compact RIO を用いてデータの計測および解析をリアルタイムで行う。

プログラムの概略を次に示す。FPGA でデータを測定し、Host PC で解析を行うような設計で、FPGA と Host PC との間のやり取りは FIFO メモリを介して行う。伝達関数測定時のみ正弦波を印加し、それ以外の時には 0 を印加する。また低周波帯域のデータ測定時にサンプリング周波数が高いままだとメモリが不足するので、データの間引きを行い実効的なサンプリング周波数を下げることによってこの問題を回避している。これらのデータ計測系はデジタルフィルタ処理に影響しないように並列で実行する。

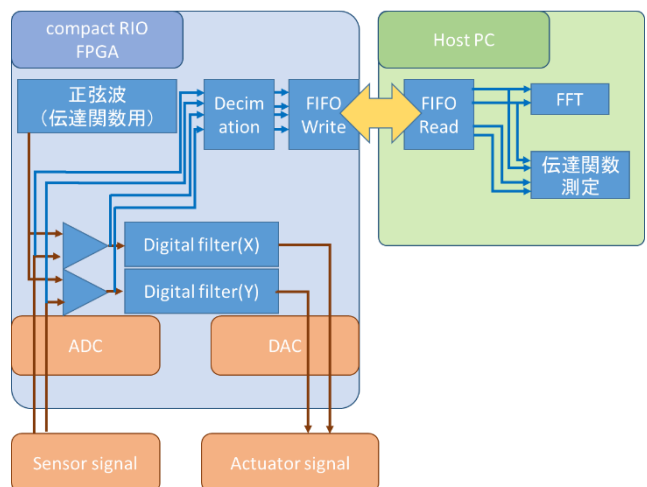


図8 プログラムの概略図

4. 実験

防振システムを実際に構築し、どれだけの防振効果が得られるか実験した。

・(1) x 軸方向制御

初めに x 軸方向のみの 1 自由度制御を行い、スペクトルを計測することにより、防振性能の評価をした。次にその結果を示す。

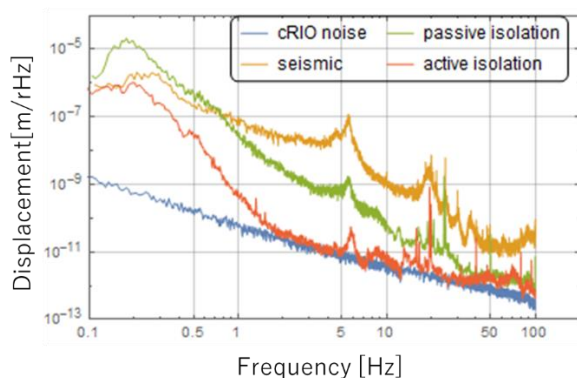


図 9 1 自由度における能動防振の結果

橙線が通常の地面振動スペクトル、緑線は除振台の上で計測したスペクトル、赤線がフィードバック制御を掛けたときに計測したスペクトルである。目的の周波数帯である 1~5Hz に着目すると、最大-60dB の防振が達成されていることがわかる。20Hz 以上の周波数では compact RIO のノイズ(青線)に埋もれてしまっている。

・(2) x, y 軸方向制御

x 軸方向の制御を掛けている状態で、y 方向にも制御を掛け、スペクトルを計測した。その結果を次に示す。

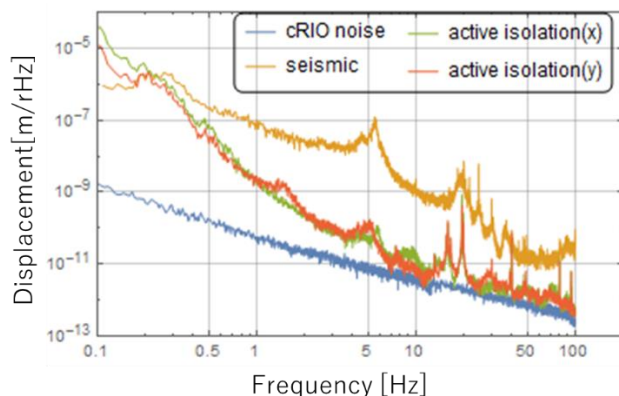


図 10 2 自由度における能動防振の結果

フィードバック制御により防振効果が得られているが、図 9 と比べると 0.1Hz~5Hz でスペクトルが悪化しており、防振比は最大-40dB 程度になっていることがわかる。

5. 結果と考察

1 自由度の能動防振では目的の周波数である 1~5Hz で最大-60dB の防振効果が得られた。その後の 2 自由度の能動防振ではその防振効果は-40dB 程度にとどまった。この防振性能の悪化は、2 自由度制御のときのみおこることから、x 方向と y 方向の制御が互いに影響を及ぼしあっていることが原因であると推測される。

6. 展望

2 自由度制御において防振性能の悪化が見られたため、まずはこの対策が急務となる。この対策がなされた後、本格的に 6 自由度制御に向けた設計が必要となる。具体的には、センサーの増設とその信号の分離するデジタルシステム、および 6 自由度制御に最適なアクチュエータの配置などを考慮する必要がある。

全ての自由度で防振された環境で DFI の感度測定を行うことにより、残留雑音が地面振動由来かどうかを確認することができる。

謝辞

本研究をするに当たり、ご助力いただいた方々に深く感謝致します。

参考文献

- 1) B. P. Abbott et al., "Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger", Phys. Rev. Lett., 116, 061102 (2016)
- 2) Seiji Kawamura, Yanbei Chen: Displacement-Noise - Free Gravitational-Wave Detection, DOI: 10.1103, PhysRevLett.93.211103, pp. 2, 2004
- 3) Shuichi Sato et al., "Demonstration of Displacement- and Frequency-Noise-Free Laser Interferometry Using Bidirectional Mach-Zehnder Interferometers" Phys. Rev. Lett. 98.141101, (2007)
- 4) 田島茂樹; 重力波検出のための変位雑音フリー干渉計 (DFI) を用いた超精密測定, 修士論文, 2014
- 5) 白澤光純; 変位雑音フリー干渉計重力波検出器の開発, 学位論文, 2015
- 6) 我妻一博; 重力波検出器 TAMA300 における低周波防振装置 SAS の性能評価及び制御方法についての研究, 修士論文, 2007